

# Betriebssysteme (BS)

## VL 2 – Einstieg in die Betriebssystementwicklung

**Daniel Lohmann**

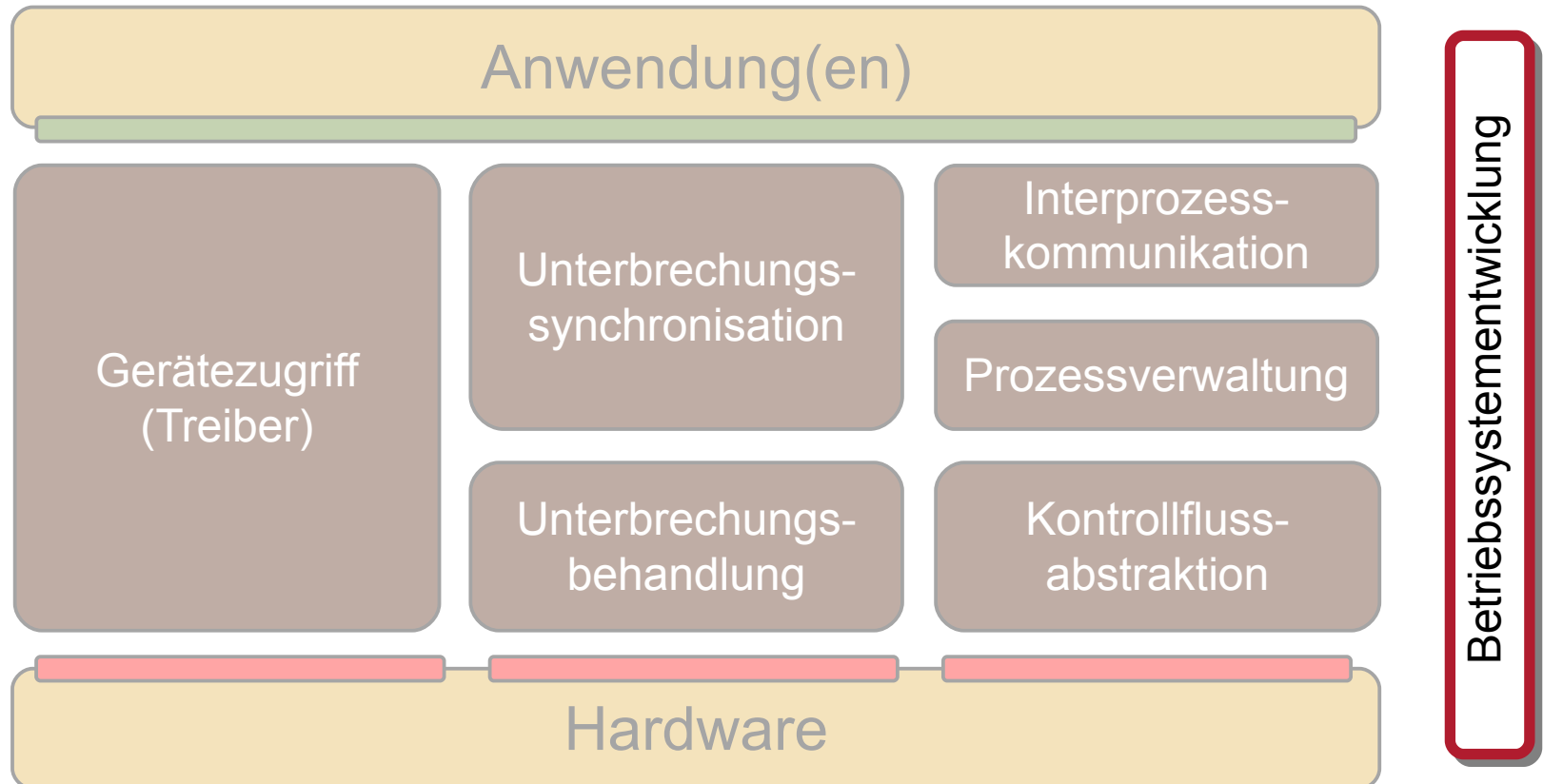
Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen Nürnberg

WS 12 – 24. Oktober 2012



# Überblick: Einordnung dieser VL



# BS-Entwicklung (oft ein harter Kampf)

- erste Schritte  
wie bringt man sein System auf die Zielhardware?
  - Übersetzung
  - Bootvorgang
- Testen und *Debugging*  
was tun, wenn das System nicht reagiert?
  - „printf“ *debugging*
  - Emulatoren
  - *debugger*
  - *remote debugging*
  - Hardwareunterstützung



# Übersetzung – *Hello, World?*

```
#include <iostream>

int main () {
    std::cout << "Hello, World" << std::endl;
}
```

```
> g++ -o hello hello.cc
```

- Annahme:
  - das Entwicklungssystem läuft unter Linux/x86
  - das Zielsystem ist ebenfalls ein PC
- Läuft dieses Programm auch auf der „nackten“ Hardware?
- Kann man Betriebssysteme überhaupt in einer Hochsprache entwickeln?



# Übersetzung – Probleme u. Lösungen

---

- kein dynamischer Binder vorhanden
  - alle nötigen **Bibliotheken statisch einbinden**.
- libstdc++ und libc benutzen Linux Systemaufrufe (insbesondere write)
  - die normalen C/C++ **Laufzeitbibliotheken können nicht benutzt werden**. Andere haben wir (meistens) nicht.
- generierte Adressen beziehen sich auf virtuellen Speicher! ("nm hello | grep main" liefert "0804846c T main")
  - die Standardeinstellungen des Binders können nicht benutzt werden. **Man benötigt eine eigene Binderkonfiguration**.
- der Hochsprachencode stellt Anforderungen (Registerbelegung, Adressabbildung, Laufzeitumgebung, Stapel, ...)
  - ein eigener **Startup-Code** (in Assembler erstellt) muss die Ausführung des Hochsprachencodes vorbereiten



# Bootvorgang

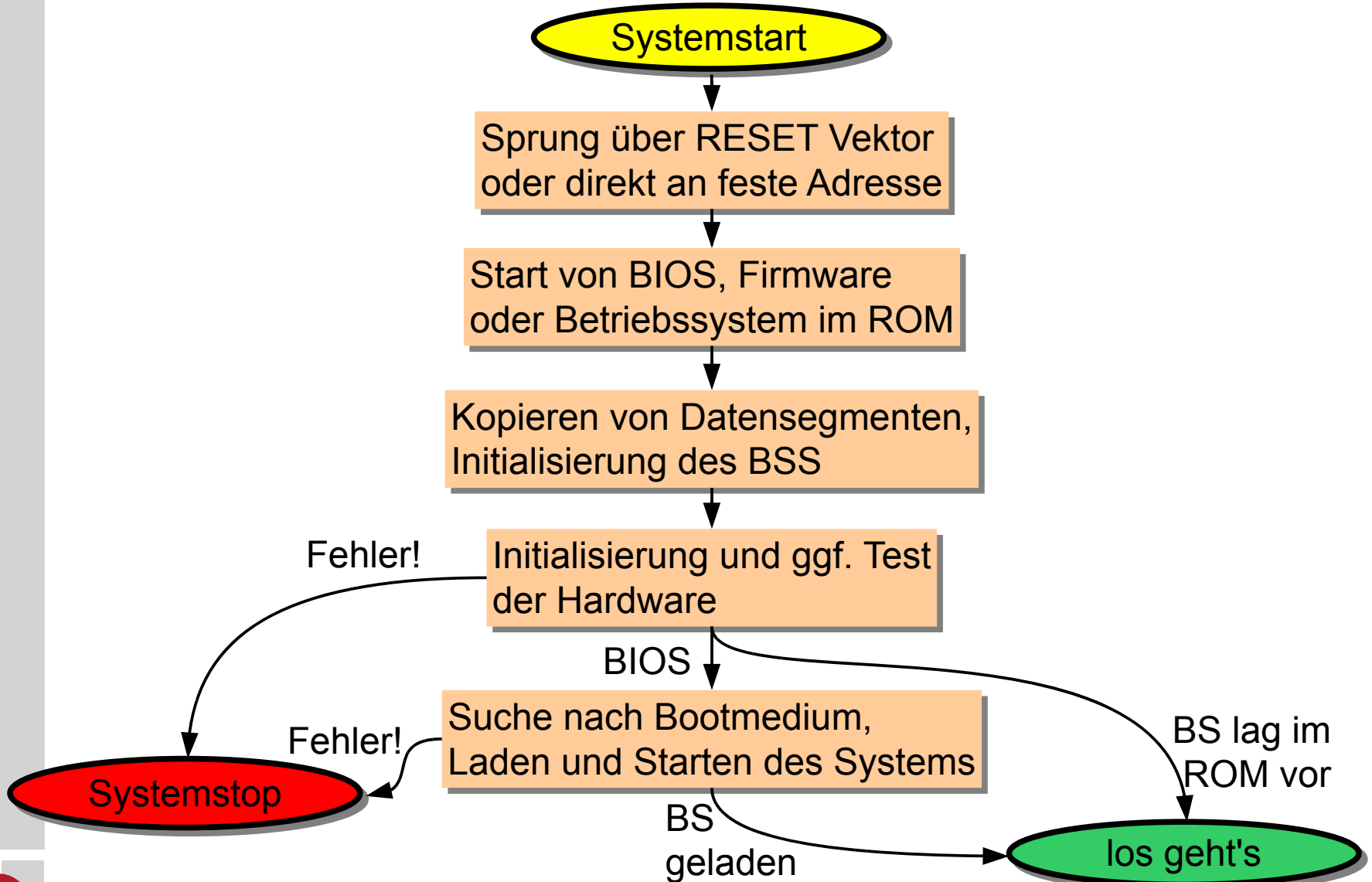
„**Bootstrapping** (englisches Wort für Stiefelschlaufe) bezeichnet einen Vorgang bei dem ein einfaches System ein komplexeres System startet. Der Name des Verfahrens kommt von der **Münchhausen-Methode**.“

„Die **Münchhausen-Methode** bezeichnet allgemein, dass ein System sich selbst in Gang setzt. Die Bezeichnung spielt auf die deutsche Legende von **Baron Münchhausen** an, der sich an seinen eigenen Haaren aus einem Sumpf gezogen haben soll. In der amerikanischen Fassung benutzte er seine Stiefelschlaufen, was die englische Bezeichnung **Bootstrapping** für diese Methode begründete.“

wikipedia.de



# Bootvorgang



# Bootvorgang beim PC – Boot Sektor

- das PC BIOS lädt den 1. Block (512 Bytes) des Boot-Laufwerks an die Adresse 0x7c00 und springt dorthin (blind!)
- Aufbau des „Boot Sektors“:

## FAT Diskette (DOS/Windows)

Offset	Inhalt
0x0000	jmp boot; nop; (ebx90)
0x0003	Systemname und Version
0x000b	Bytes pro Sektor
0x000d	Sektoren pro Cluster
0x000e	reservierte Sektoren (für Boot Record)
0x0010	Anzahl der FATs
0x0011	Anzahl der Stammverzeichniseinträge
0x0013	Anzahl der logischen Sektoren
0x0015	Medium-Deskriptor-Byte
0x0016	Sektoren pro FAT
0x001a	Anzahl der Köpfe
0x001c	Anzahl der verborgenen Sektoren
0x001e	boot: ...
0x01fe	0xaa55



# Bootvorgang beim PC – Boot Sektor

- das PC BIOS lädt den 1. Block (512 Bytes) des Boot-Laufwerks an die Adresse 0x7c00 und springt dorthin
- Aufbau des „Boot Sektors“:

**Alternative**  
(OO-StuBS):

Wichtig ist eigentlich nur der Start und die „**Signatur**“ (0xaa55) am Ende. Alles weitere benutzt der **Boot Loader**, um das eigentliche System zu laden.

Offset	Inhalt
0x0000	<code>jmp boot;</code>
0x0004	Anzahl der Spuren
0x0006	Anzahl der Köpfe
0x0008	Anzahl der Sektoren
0x000a	reservierte Sektoren (Setup-Code)
0x000c	reservierte Sektoren (System)
0x000e	BIOS Gerätecode
0x000f	Startspur der Diskette/Partition
0x0010	Startkopf der Diskette/Partition
0x0011	Startsektor der Diskette/Partition
0x0010	<code>boot:</code> ... ...
0x01fe	<b>0xaa55</b>



# Bootvorgang beim PC – *Boot Loader*

---

- einfache, systemspezifische *Boot Loader*
  - Herstellung eines definierten Startzustands der Hard- und Software
  - ggf. Laden weiterer Blöcke mit *Boot Loader Code*
  - Lokalisierung des eigentlichen Systems auf dem Boot-Medium
  - Laden des Systems (mittels Funktionen des BIOS)
  - Sprung in das geladene System
  
- "*Boot-Loader*" auf nicht boot-fähigen Disketten
  - Ausgabe einer Fehlermeldung und Neustart
  
- *Boot Loader* mit Auswahlmöglichkeit (z.B. im *Master Boot Record* einer Festplatte)
  - Darstellung eines Auswahlmenüs
  - Nachbildung des BIOS beim Booten des ausgewählten Systems
    - Laden des jeweiligen Boot Blocks nach 0x7c00 und Start



# Debugging



# Der erste dokumentierte „Bug“

9/9


0800 Antan started  
 1000 " stopped - antan ✓

13<sup>00</sup> (032) MP - MC ~~1.982649000~~ { 1.2700 9.037 847 025  
 (033) PRO 2 2.130476415 } 9.037 846 895 connect  
 connect 2.130676415 4.615925059(-2)

Relays 6-2 in 033 failed special speed test  
 in Relay " 10.000 test.

Relays changed

1100 Started Cosine Tape (Sine check)  
 1525 Started Mult + Adder Test.

1545  Relay #70 Panel F  
 (moth) in relay.

First actual case of bug being found.

~~1630~~ 1630 antan started.  
 1700 closed down.

Relay 2145  
 Relay 3376

Quelle: Wikipedia

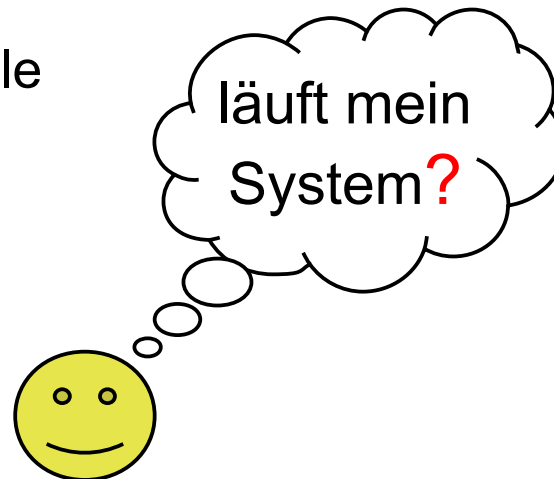
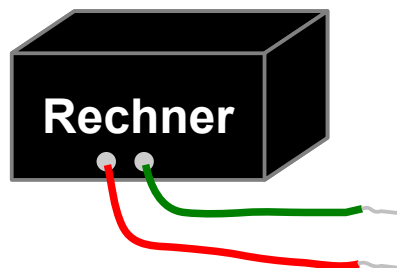


Admiral Grace Hopper



# „printf - Debugging“

- gar nicht so einfach, da es `printf()` per se nicht gibt!
  - oftmals gibt es nicht mal einen Bildschirm
- `printf()` ändert oft auch das Verhalten des *debuggee*
  - mit `printf()` tritt der Fehler nicht plötzlich nicht mehr / anders auf
  - das gilt gerade auch bei der Betriebssystementwicklung
- Strohhalm
  - eine blinkende LED
  - eine serielle Schnittstelle



# (Software-)Emulatoren

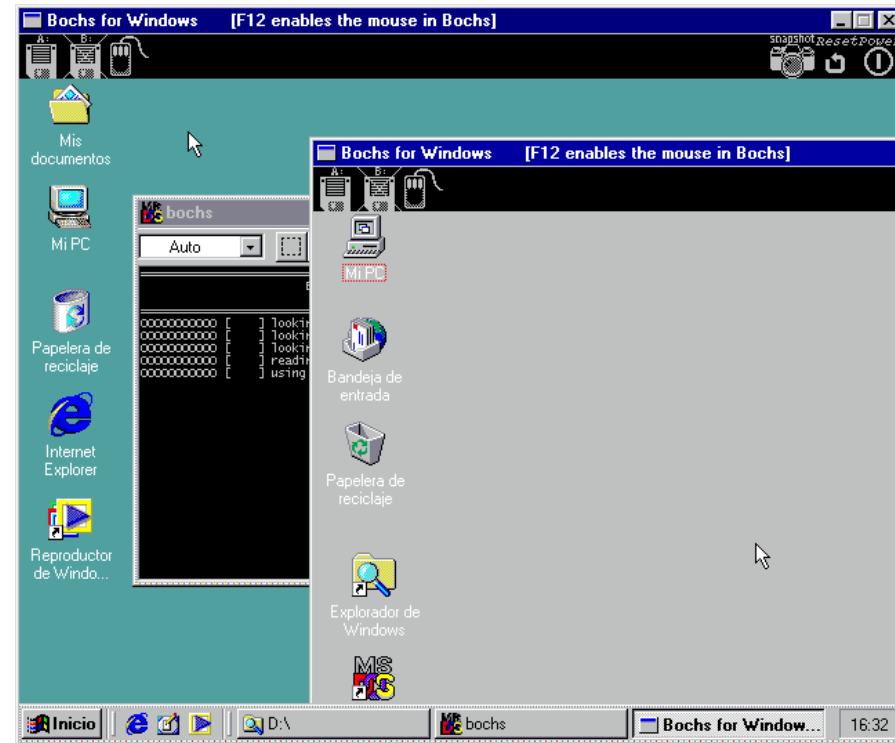
---

- ahmen reale Hardware in Software nach
  - einfacheres Debugging, da die Emulationssoftware in der Regel kommunikativer als die reale Hardware ist
  - kürzere Entwicklungszyklen
- Vorsicht: am Ende muss das System auf realer Hardware laufen!
  - in Details können sich Emulator und reale Hardware unterscheiden!
  - im fertigen System sind Fehler schwerer zu finden als in einem inkrementell entwickelten System
- übrigens: "virtuelle Maschinen" und "Emulatoren" sind **nicht** gleichbedeutend
  - in VMware wird z.B. kein x86 Prozessor emuliert, sondern ein vorhandener Prozessor führt Maschinencode in der VM direkt aus



# Emulatoren – Beispiel "Bochs"

- emuliert i386, ..., Pentium, AMD64 (Interpreter)
  - optional MMX, SSE, SSE2 und 3DNow! Instruktionen
  - Multiprozessoremulaton
- emuliert kompletten PC
  - Speicher, Geräte (selbst Sound- und Netzwerkkarte)
  - selbst Windows und Linux Systeme laufen in Bochs
- implementiert in C++
- Entwicklungsunterstützung
  - Protokollinformationen, insbesondere beim Absturz
  - eingebauter Debugger (GDB-Stub)



Bochs in Bochs



# Debugging

- ein *Debugger* dient dem Auffinden von Software-Fehlern durch Ablaufverfolgung
  - in Einzelschritten (*single step mode*)
  - zwischen definierten Haltepunkten (*breakpoints*), z.B. bei
    - Erreichen einer bestimmten Instruktion
    - Zugriff auf ein bestimmtes Datenelement
- **Vorsicht:** manchmal dauert die Fehlersuche mit einem Debugger länger als nötig
  - wer gründlich nachdenkt kommt oft schneller zum Ziel
    - Einzelschritte kosten viel Zeit
    - kein Zurück bei versehentlichem Verpassen der interessanten Stelle
  - beim printf-Debugging können Ausgaben besser aufbereitet werden
  - Fehler im Bereich der Synchronisation nebenläufiger Aktivitäten sind interaktiv mit dem Debugger praktisch nicht zu finden
- **praktisch: Analyse von "core dumps"**
  - beim Betriebssystembau allerdings weniger relevant



# Debugging - Beispielsitzung

Setzen eines  
Abbruchpunktes

Start des  
Programms

Ablaufverfolgung  
im Einzelschritt-  
modus

Fortsetzung des  
Programms

```
spinczyk@fau148:~> gdb hello
GNU gdb 6.3
...
(gdb) break main
Breakpoint 1 at 0x8048738: file hello.cc, line 5.
(gdb) run
Starting program: hello

Breakpoint 1, main () at hello.cc:5
5         cout << "hello" << endl;
(gdb) next
hello
6         cout << "world" << endl;
(gdb) next
world
7         }
(gdb) continue
Continuing.

Program exited normally.
(gdb) quit
```



# Debugging – Funktionsweise (1)

- praktisch alle CPUs unterstützen das *Debugging*
- Beispiel: Intels x86 CPUs
  - die **INT3** Instruktion löst "*breakpoint interrupt*" aus (ein *TRAP*)
    - wird gezielt durch den *Debugger* im Code platziert
    - der *TRAP-Handler* leitet den Kontrollfluss in den *Debugger*
  - durch Setzen des **Trap Flags (TF)** im Statusregister (EFLAGS) wird nach **jeder** Instruktion ein "*debug interrupt*" ausgelöst
    - kann für die Implementierung des Einzelschrittmodus genutzt werden
    - der *TRAP-Handler* wird nicht im Einzelschrittmodus ausgeführt
  - mit Hilfe der **Debug Register DR0-DR7** (ab i386) können bis zu vier Haltepunkte überwacht werden, ohne den Code manipulieren zu müssen
    - erheblicher Vorteil bei Code im ROM/FLASH oder nicht-schreibbaren Speichersegmenten

→ nächste Folie





# Debugging – Funktionsweise (2)

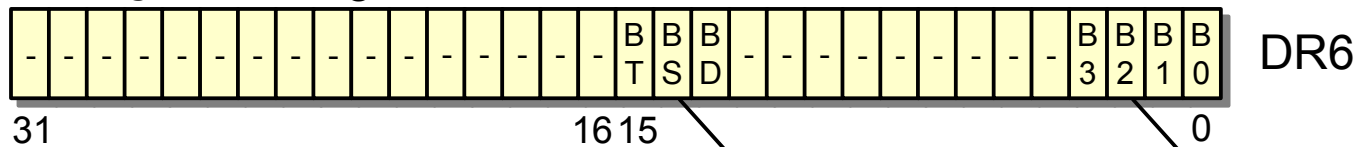
## die Debug Register des 80386

### Breakpoint Register

breakpoint 0: lineare Adresse	DR0
breakpoint 1: lineare Adresse	DR1
breakpoint 2: lineare Adresse	DR2
breakpoint 3: lineare Adresse	DR3
reserviert	DR4
reserviert	DR5

gibt dem *Trap Handler* Auskunft über die Ursache des *Traps*

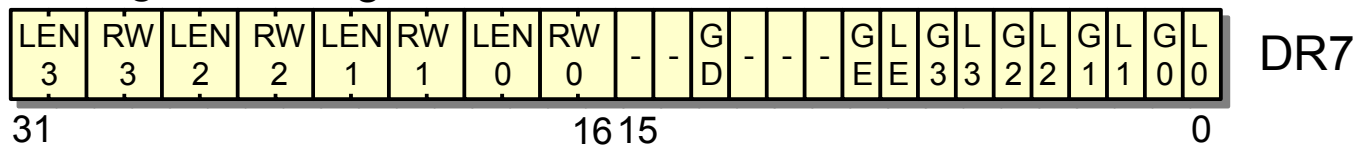
### Debug Statusregister



**Einzelschritt**

**Breakpoint 0-3**

### Debug Steuerregister



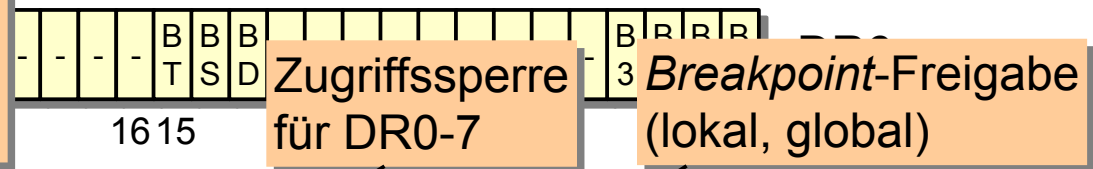
# Debugging – Funktionsweise (2)

## die Debug Register des 80386

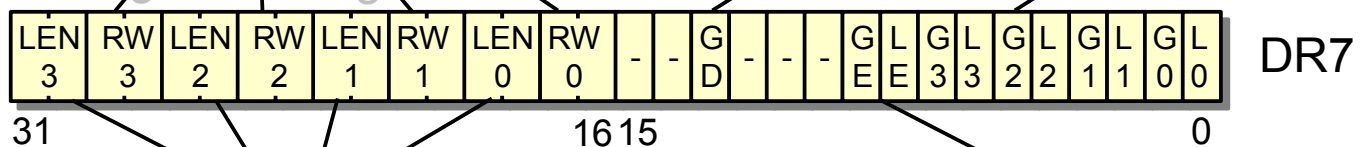
### Breakpoint Register

breakpoint 0: lineare Adresse	DR0
breakpoint 1: lineare Adresse	DR1
breakpoint 2: lineare Adresse	DR2
breakpoint 3: lineare Adresse	DR3
reserviert	DR4
reserviert	DR5

Abbruch-Ereignis  
 00: Befehlausführung  
 01: Schreiben  
 10: I/O (ab Pentium)  
 11: Schreiben/Lesen



### Debug Steuerregister



Länge des überwachten Speicherbereichs

exakter Daten-Breakpoint (lokal, global)



# Debugging – Funktionsweise (3)

- besonders effektiv wird Debugging, wenn das Programm im Quelltext visualisiert wird (*source-level debugging*)
  - erfordert Zugriff auf den Quellcode und Debug-Informationen
  - muss durch den Übersetzer unterstützt werden

```
Tohmann@fai48:~> g++ -o hello -g hello.cc
Tohmann@fai48:~> objdump --section-headers hello
hello:      file format elf32-i386
Sections:
Idx Name          Size      VMA           LMA           File off  Algn
...
 26 .debug_aranges 00000098   00000000   00000000   00000ca0  2**3
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 27 .debug_pubnames 00000100   00000000   00000000   00000d38  2**0
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 28 .debug_info     000032b8   00000000   00000000   00000e38  2**0
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 29 .debug_abbrev   00000474   00000000   00000000   000040f0  2**0
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 30 .debug_line     000003ac   00000000   00000000   00004564  2**0
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 31 .debug_frame    0000008c   00000000   00000000   00004910  2**2
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
 32 .debug_str      000001c7   00000000   00000000   0000499c  2**0
           CONTENTS, READONLY, DEBUGGING
Tohmann@fai48:~>
```



# Remote Debugging

- bietet die Möglichkeit Programme auf Plattformen zu *debuggen*, die (noch) kein interaktives Arbeiten erlauben
  - setzt eine Kommunikationsverbindung voraus (seriell, Ethernet, ...)
  - erfordert einen Gerätetreiber
  - der Zielrechner kann auch ein Emulator sein (z.B. Bochs)
- die *Debugging*-Komponente auf dem Zielsystem (*stub*) sollte möglichst einfach sein



# Remote Debugging – Beispiel gdb (1)

- das Kommunikationsprotokoll ("GDB *Remote Serial Protocol*" - RSP)
  - spiegelt die Anforderungen an den gdb *stub* wieder
  - basiert auf der Übertragung von ASCII Zeichenketten
  - Nachrichtenformat: **\$**<Kommando oder Antwort>**#**<Prüfsumme>
  - Nachrichten werden unmittelbar mit **+** (OK) oder **-** (Fehler) beantwortet
- Beispiele:
  - **\$g#67** ▶ Lesen aller Registerinhalte
    - Antwort: **+** **\$**123456789abcdef0...**#**... ▶ Reg. 1 ist 0x12345678, 2 ist 0x9...
  - **\$G123456789abcdef0...#...** ▶ Setze Registerinhalte
    - Antwort: **+** **\$**OK**#**9a ▶ hat funktioniert
  - **\$m4015bc,2#5a** ▶ Lese 2 Bytes ab Adresse 0x4015bc
    - Antwort: **+** **\$**2f86**#**06 ▶ Wert ist 0x2f86



# Remote Debugging – Beispiel gdb (2)

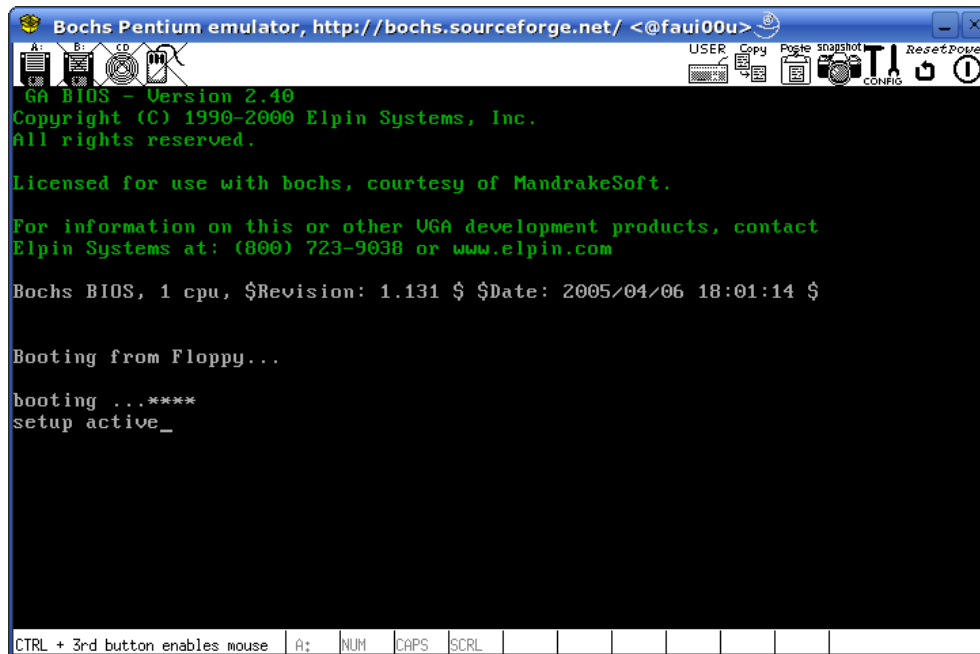
- das Kommunikationsprotokoll – kompletter Umfang
  - Register- und Speicherbefehle
    - lese/schreibe alle Register
    - lese/schreibe einzelnes Register
    - lese/schreibe Speicherbereich
  - Steuerung der Programmausführung
    - letzte Unterbrechungsursache abfragen
    - Einzelschritt
    - mit Ausführung fortfahren
  - Sonstiges
    - Ausgabe auf der *Debug* Konsole
    - Fehlermeldungen
- allein "schreibe einzelnes Register", "lese/schreibe Speicherbereich" und "mit Ausführung fortfahren" müssen notwendigerweise vom *stub* implementiert werden



# Remote Debugging – mit Bochs

- durch geeignete Konfigurierung vor der Übersetzung kann der Emulator Bochs auch einen `gdb stub` implementieren

```
> bochs-gdb build/bootdisk.img
...
Waiting for gdb connection on
localhost:10452
```



The screenshot shows a window titled "Bochs Pentium emulator, http://bochs.sourceforge.net/ <@fau100u>". The window contains a terminal-like interface with green text on a black background. The text displays the BIOS version (2.40), copyright information (1990-2000 Elpin Systems, Inc.), and licensing details. It also shows the system configuration (1 cpu, revision 1.131, date 2005/04/06 18:01:14) and the boot process starting from a floppy disk. The booting progress is shown as "booting ...\*\*\*\*" and "setup active\_". At the bottom of the window, there is a status bar with the text "CTRL + 3rd button enables mouse" and a row of keyboard function keys: A:, NUM, CAPS, SCRL, and several empty slots.

```
Bochs Pentium emulator, http://bochs.sourceforge.net/ <@fau100u>
GA BIOS - Version 2.40
Copyright (C) 1990-2000 Elpin Systems, Inc.
All rights reserved.

Licensed for use with bochs, courtesy of MandrakeSoft.

For information on this or other UGA development products, contact
Elpin Systems at: (800) 723-9038 or www.elpin.com

Bochs BIOS, 1 cpu, $Revision: 1.131 $ $Date: 2005/04/06 18:01:14 $

Booting from Floppy...

booting ...****
setup active_

CTRL + 3rd button enables mouse  A:  NUM  CAPS  SCRL
```



# Remote Debugging – mit Bochs

```
> gdb build/system
GNU gdb 6.3-debian
...
(gdb) break main
Breakpoint 1 at 0x11fd8: file main.cc, line 38.
(gdb) target remote localhost:10452
Remote debugging using localhost:10452
0x0000fff0 in ?? ()
(gdb) continue
Continuing.

Breakpoint 1, main () at main.cc:38
38      Application application(app1_stack+sizeof(app1_stack));
(gdb) next
43      for (y=0; y<25; y++)
(gdb) next
44          for (x=0; x<80; x++)
(gdb) next
45          kout.show (x, y, ' ', CGA_Screen::STD_ATTR);
(gdb) continue
Continuing.
```



# Debugging Deluxe

---

- viele Prozessorhersteller integrieren heute Hardwareunterstützung für *Debugging* auf ihren Chips (*OCDS – On Chip Debug System*)
  - BDM, OnCE, MPD, JTAG
- i.d.R. einfaches serielles Protokoll zwischen *Debugging*-Einheit und externem *Debugger* (Pins sparen!)
- Vorteile:
  - der *Debug Monitor* (z.B. *gdb stub*) belegt keinen Speicher
  - Implementierung eines *Debug Monitors* entfällt
  - Haltepunkte im ROM/FLASH durch Hardware-Breakpoints
  - Nebenläufiger Zugriff auf Speicher und CPU Register
  - mittels Zusatzhardware ist zum Teil auch das Aufzeichnen des Kontrollflusses zwecks nachträglicher Analyse möglich



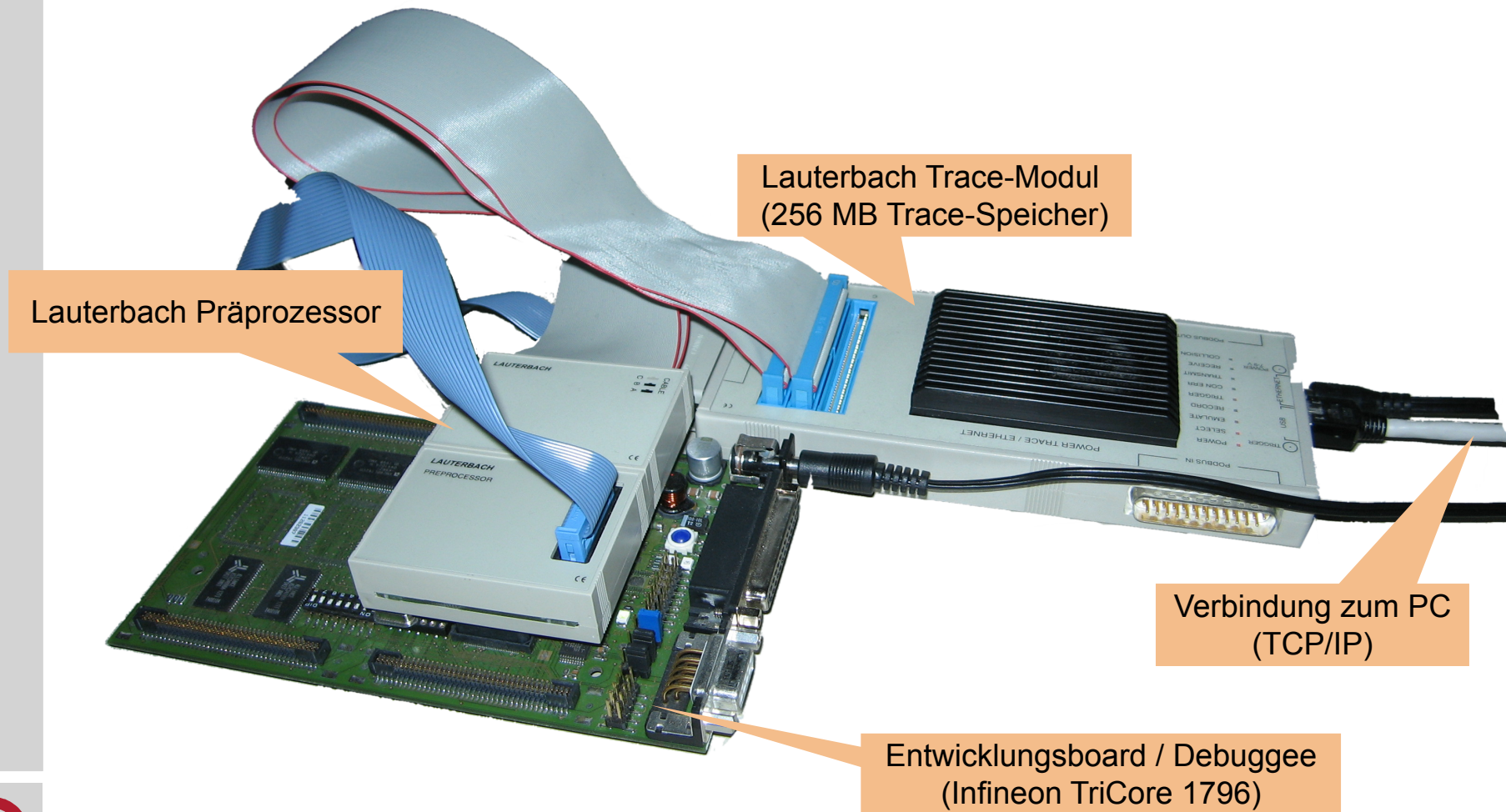
# Debugging Deluxe – Beispiel BDM

- *"Background Debug Mode"* - eine *on-chip debug* Lösung von Motorola
- serielle Kommunikation über drei Leitungen (DSI, DSO, DSCLK)
- BDM Kommandos der 68k und ColdFire Prozessoren
  - RAREG/RDREG – Read Register
    - lese bestimmtes Daten- oder Adressregister
  - WAREG/WDREG – Write Register
    - schreibe bestimmtes Daten- oder Adressregister
  - READ/WRITE – Read Memory/Write Memory
    - lese/schreibe eine bestimmte Speicherstelle
  - DUMP/FILL – Dump Memory/Fill Memory
    - lese/fülle einen ganzen Speicherblock
  - BGND/GO – Enter BDM/Resume
    - Ausführung stoppen/wieder aufnehmen



# Debugger Deluxe: Hardware-Lösung

## ■ Lauterbach Hardware-Debugger



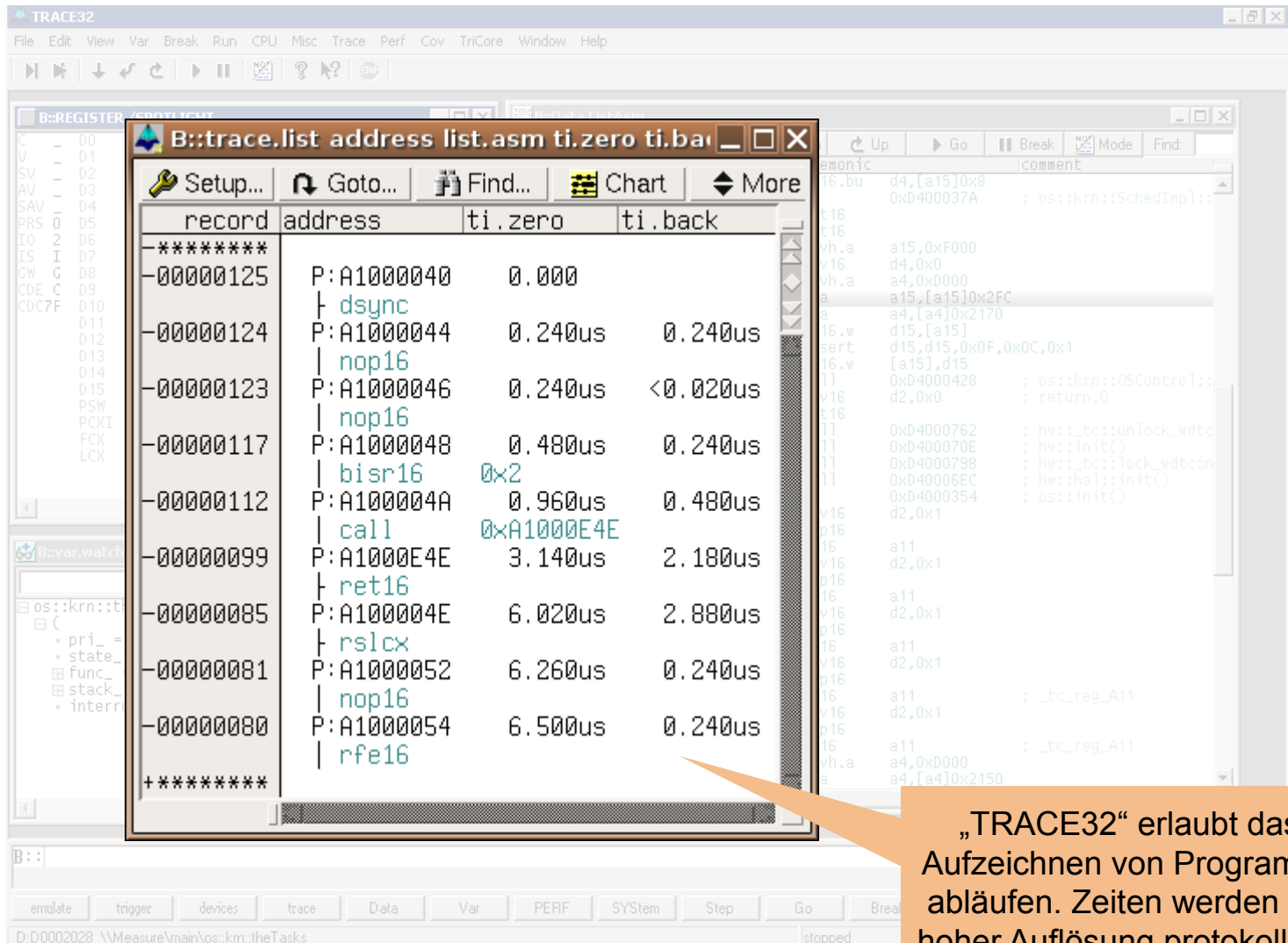
# Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend

The screenshot displays the TRACE32 debugger interface with the following components:

- TRACE32 Title Bar:** File Edit View Var Break Run CPU Misc Trace Perf Cov TriCore Window Help
- Navigation Bar:** Includes icons for step, over, return, up, go, break, and mode.
- B::REGISTER / SPOTLIGHT:** Shows register values for C (D0), V (D1), SV (D2), AV (D3), SAV (D4), PRS (D5), IO (D6), IS (D7), GW (D8), CDE (D9), CDC7F (D10-D15), PSW, PCXI, FCX, and LCX.
- B::Data.ListAsm:** Displays assembly code with columns for address, code, label, mnemonic, and comment. The current instruction is `lea a15, [a15]0x2FC` at address `P:D40002F0`.
- B::var.watch os::krn::theTasks:** Shows the structure of `os::krn::theTasks` with fields: `pri_ = 3`, `state_ = SUSPENDED`, `func_ = 0xD4000290`, `stack_ = 0xD0002150`, and `interrupted_ = 0`.
- Bottom Panel:** Includes buttons for `emulate`, `trigger`, `devices`, `trace`, `Data`, `Var`, `PERF`, `SYStem`, `Step`, `Go`, `Break`, `Register`, `sYmbol`, `other`, and `previous`. The status bar shows `D:D0002028 \\Measure\main\os::krn::theTasks` and `stopped`.



# Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



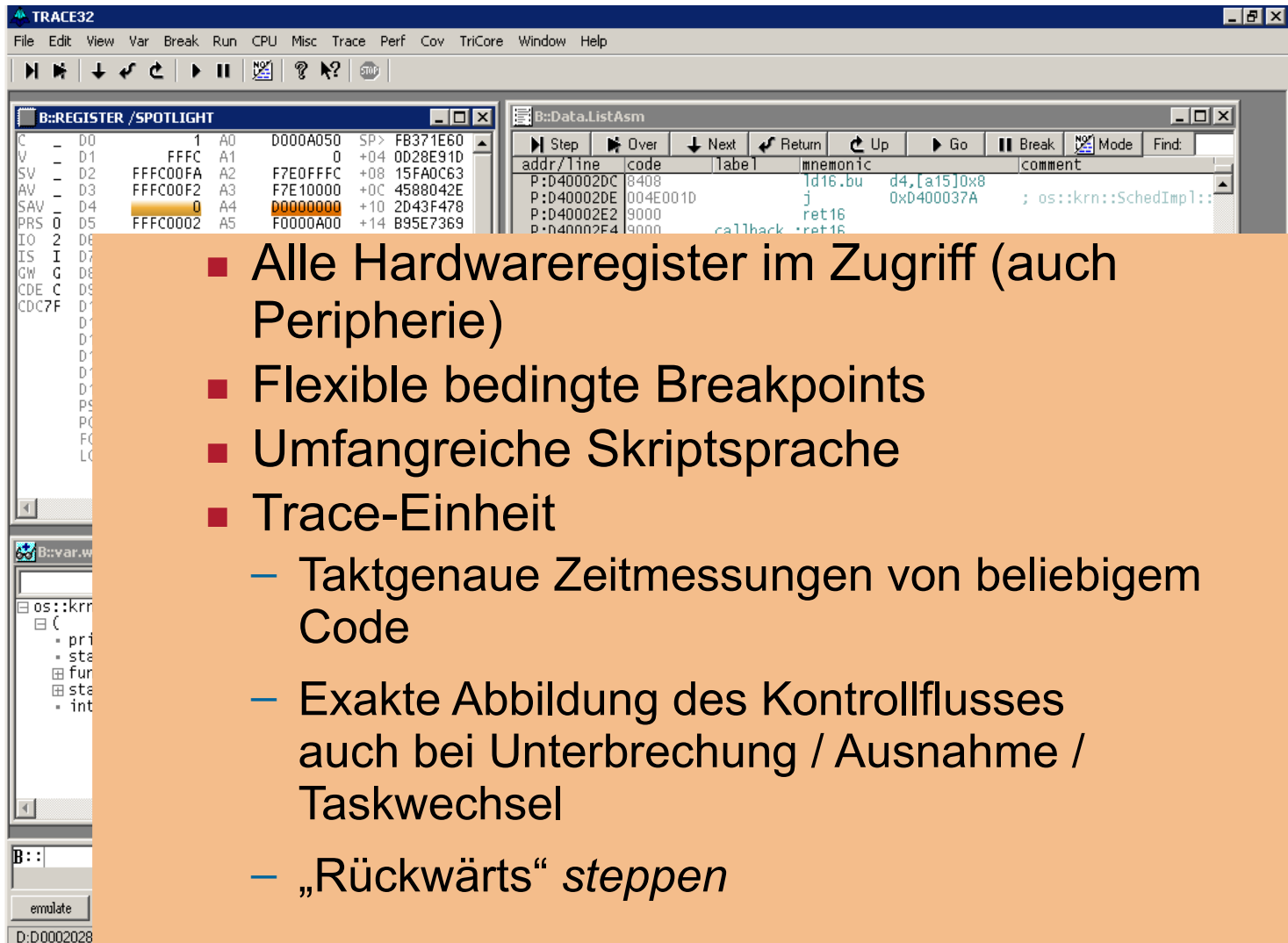
B::trace.list address list.asm ti.zero ti.ba

record	address	ti.zero	ti.back
*****			
-00000125	P: A1000040   dsync	0.000	
-00000124	P: A1000044   nop16	0.240us	0.240us
-00000123	P: A1000046   nop16	0.240us	<0.020us
-00000117	P: A1000048   bisr16 0x2	0.480us	0.240us
-00000112	P: A100004A   call 0xA1000E4E	0.960us	0.480us
-00000099	P: A1000E4E   ret16	3.140us	2.180us
-00000085	P: A100004E   rslcx	6.020us	2.880us
-00000081	P: A1000052   nop16	6.260us	0.240us
-00000080	P: A1000054   rfe16	6.500us	0.240us
+*****			

„TRACE32“ erlaubt das Aufzeichnen von Programmabläufen. Zeiten werden mit hoher Auflösung protokolliert.



# Debugger Deluxe: Lauterbach-Frontend



The screenshot shows the TRACE32 debugger interface. The main window displays assembly code with columns for address, code, label, mnemonic, and comment. The register window (B::REGISTER / SPOTLIGHT) shows various registers (C, V, SV, AV, SAV, PRS, IO, IS, GW, CDE, CDC) and their values. The variable window (B::var.w) shows a tree view of variables. The interface includes a menu bar (File, Edit, View, Var, Break, Run, CPU, Misc, Trace, Perf, Cov, TriCore, Window, Help) and a toolbar with navigation and execution controls.

- Alle Hardwareregister im Zugriff (auch Peripherie)
- Flexible bedingte Breakpoints
- Umfangreiche Skriptsprache
- Trace-Einheit
  - Taktgenaue Zeitmessungen von beliebigem Code
  - Exakte Abbildung des Kontrollflusses auch bei Unterbrechung / Ausnahme / Taskwechsel
  - „Rückwärts“ *steppen*
  - ...



# Zusammenfassung

---

- Betriebssystementwicklung unterscheidet sich deutlich von gewöhnlicher Applikationsentwicklung:
  - Bibliotheken fehlen
  - die „nackte“ Hardware bildet die Grundlage
- die ersten Schritte sind oft die schwersten
  - Übersetzung
  - Bootvorgang
  - Systeminitialisierung
- komfortable Fehlersuche erfordert eine Infrastruktur
  - Gerätetreiber für *printf-Debugging*
  - STUB und Verbindung/Treiber für *Remote Debugging*
  - Hardware Debugging-Unterstützung wie mit BDM
  - Optimal: Hardware-Debugger wie Lauterbach

